



Neurosciences cognitives et éducation : le début d'une collaboration

**Eric TARDIF¹, Haute école pédagogique, Lausanne (Suisse)
et Pierre-André DOUDIN², Haute école pédagogique,
Lausanne et Université de Lausanne (Suisse)**

Les avancées récentes en neurosciences cognitives suscitent actuellement un débat concernant leur application au domaine de l'éducation. Bien que potentiellement prometteuse, cette nouvelle collaboration entre deux domaines très distincts implique de prendre de nombreuses précautions. Dans cet article, nous souhaitons d'une part signaler quelques fausses croyances issues d'une mauvaise interprétation des résultats scientifiques et d'autre part, illustrer par certaines études les aspects encourageants d'une collaboration entre les neurosciences cognitives et l'éducation. Quelques lignes de force qui pourraient favoriser une approche multidisciplinaire de l'éducation sont proposées.

Mots-clés : neurosciences, cerveau, apprentissage, développement, lecture, langage, dyslexie

Introduction

Les avancées récentes en neurosciences cognitives et leurs contributions au domaine de l'éducation soulèvent actuellement un important débat. En effet, ces deux domaines partagent depuis longtemps de nombreux champs d'intérêts tels que le développement de l'enfant et de l'adolescent, l'apprentissage, la mémoire, les émotions, la motivation, les problèmes de comportement, le langage et la communication. Toutefois, un large fossé continue de les séparer (Byrnes & Fox, 1998; Bruer, 1997; Ansari & Coch, 2006). D'une part, le manque de connaissances en neurosciences cognitives de la part d'enseignants et de professionnels de l'éducation peut mener à des conclusions hâtives ainsi qu'à des interventions qui ne sont pas fondées sur des recherches scientifiques et dont l'efficacité n'est souvent pas clairement démontrée. Ce manque de connaissances limite également le regard critique nécessaire pour bien évaluer différentes sources d'informations qui tentent de mettre en rapport le cerveau et l'éducation. D'autre part, les chercheurs en neurosciences cognitives, souvent éloignés des institutions scolaires, sont la plupart du temps mal situés pour bien comprendre les besoins des enseignants. Alors que les

1. Contact : eric.tardif@hepl.ch. .

2. Contact : pierre-andre.doudin@hepl.ch.



chercheurs en neurosciences cognitives s'efforcent de mettre en évidence les mécanismes cérébraux qui sous-tendent des processus cognitifs, les éducateurs souhaiteraient pour leur part, bénéficier de nouvelles méthodes d'apprentissage « qui soient efficaces ». A l'heure actuelle, les applications directes de résultats obtenus en neurosciences cognitives au niveau de la salle de classe sont plutôt rares, mais certains résultats sont encourageants, notamment dans les domaines de l'apprentissage du langage et de la lecture (e.g. Tallal, 2004; Shaywitz, Morris & Shaywitz, 2007). De plus, un nombre croissant d'éducateurs, de psychologues, de chercheurs en éducation et en neurosciences souhaitent développer les liens récents qui unissent pédagogie et cerveau au point qu'un journal scientifique dédié à ce sujet ait été créé en 2007³.

Dans cet article, nous faisons le point sur l'état actuel des liens existants entre les neurosciences cognitives et l'éducation. Le concept de *neuromythe* est d'abord discuté à partir de certains exemples puis des champs d'études en neurosciences cognitives qui pourraient se révéler utiles à l'éducation sont présentés. Finalement, quelques lignes de force pouvant contribuer au développement d'une approche multidisciplinaire de l'éducation sont proposées.

Les neuromythes

Le terme de *neuromythe* a été proposé par l'OCDE (2002) et repris par d'autres auteurs sur le thème des contributions possibles des neurosciences cognitives aux sciences de l'éducation (Goswami, 2004, 2006; Geake, 2008). Dans ce contexte, les *neuromythes* sont des convictions non vérifiées ou fausses sur le fonctionnement cérébral et son rôle dans l'apprentissage. Ainsi, les *neuromythes* peuvent soutenir l'exercice de diverses formes d'enseignements ou d'activités en milieu scolaire. Les créateurs de certaines méthodes d'apprentissage prétendent souvent que celles-ci sont basées sur le fonctionnement du cerveau (*brain-based*). Il est important de signaler que le rationnel sous-jacent à ces pratiques est généralement formulé à partir de résultats significatifs obtenus dans le domaine scientifique et, par conséquent, largement médiatisés. Il peut alors être difficile pour un enseignant de porter un regard critique sur les divers outils pédagogiques qui lui sont proposés. Dans le cas des *neuromythes*, les liens entre les résultats expérimentaux et leurs applications concrètes en milieu scolaire, que l'on prétend basées sur ces résultats, sont flous, voire inexistantes ou encore le fruit d'une mauvaise interprétation de la littérature scientifique. Pour donner un exemple de *neuromythe* présent en milieu scolaire, citons le très répandu « Brain Gym® »

3. Le nouveau journal *Mind, Brain and Education* (MBE; Blackwell Publishing) a été récompensé par l'Association of American Publishers. Le regroupement International Mind, Brain, and Education Society (www.imbes.org; à l'origine du journal MBE) a pour mission de favoriser les échanges entre les professionnels du monde de l'éducation, de la biologie, des sciences cognitives et du développement.



qui se présente comme une série de mouvements simples qui, soi-disant, favorisent l'apprentissage. L'individu est notamment invité à stimuler ses « points des hémisphères », situés sous les clavicules afin de transmettre des messages de l'hémisphère gauche au côté droit du corps et inversement (e.g. Dennison & Dennison, 1992). En 2008, un groupe de 13 chercheurs britanniques ont distribué une note aux autorités locales responsables de l'éducation afin de les prévenir de l'absence de fondement scientifique dans l'outil « Brain Gym® » ainsi que du manque de preuve quant à son efficacité à favoriser l'apprentissage⁴.

Bien que de nombreux neuromythes aient été relevés par des chercheurs (OCDE, 2002; Goswami, 2004, 2006; Geake, 2008), nous souhaitons illustrer ce phénomène par trois exemples que nous considérons particulièrement répandus: 1) les cerveaux gauche et droit, 2) les préférences de modalités, 3) la synaptogenèse et les périodes critiques.

Cerveau gauche et cerveau droit

Un bon exemple d'un *neuromythe* découle de la découverte de la latéralisation (ou spécialisation) hémisphérique et les croyances non fondées qui s'y rapportent. L'expression « spécialisation hémisphérique » exprime l'idée que certaines fonctions cognitives sont davantage traitées dans un hémisphère cérébral plutôt que dans l'autre. Un point important à considérer relativement à la spécialisation hémisphérique est qu'elle a été intensément étudiée chez des sujets au cerveau divisé⁵ (voir Gazzaniga, 2005 pour une synthèse récente). Des connaissances élémentaires sur l'organisation des systèmes sensoriels et moteurs permettent d'éviter une mauvaise compréhension de certains résultats et par conséquent, la formation de *neuromythes*. D'abord, l'idée que des images visuelles en provenance de l'œil droit soient entièrement analysées par l'hémisphère gauche (et *vice-versa*) est fautive, puisque nous savons que chez l'humain chaque œil envoie des projections aux deux hémisphères. Par ailleurs, l'organisation des voies visuelles est telle que les stimuli visuels présentés dans un hémichamp visuel⁶ vont d'abord être traités dans l'hémisphère opposé. Ainsi, chez les sujets callosotomisés, les deux hémisphères du cerveau ne peuvent plus communiquer car ceux-ci ont été séparés par une opération chirurgicale. C'est pourquoi une image

4. Disponible sur internet à l'adresse : <http://www.senseaboutscience.org.uk/index.php/site/project/233/> (consulté le 15 avril 2010).

5. L'expression « cerveau divisé » fait référence à des patients ayant subi une callosotomie (ou section du corps calleux). Cette opération chirurgicale consiste à sectionner totalement ou partiellement les fibres nerveuses reliant les hémisphères gauche et droit du cerveau. Elle est généralement utilisée afin de traiter certaines formes d'épilepsies graves et incontrôlables par médication.

6. Le champ visuel correspond à tout ce qui est visible par un individu qui fixe un point. Les hémichamps gauche et droit font référence aux portions du champ visuel situés à gauche et à droite du point de fixation.



présentée rapidement dans l'hémichamp visuel droit (i.e. à droite du point de fixation du patient) est analysée par l'hémisphère gauche. Dans cette situation, le sujet peut aisément nommer l'objet représenté par l'image. Par contre, une présentation du stimulus dans l'hémichamp visuel gauche (et par conséquent, un traitement de cette image par l'hémisphère droit) rend impossible la dénomination de l'image par le sujet (Gazzaniga, Bogen & Sperry, 1965). Ce résultat a permis de mettre en évidence la spécialisation de l'hémisphère gauche pour l'expression du langage chez une majorité de sujets. Par ailleurs, il faut rappeler qu'un sujet normal peut verbaliser toute image présentée dans l'un ou l'autre hémichamp visuel grâce au corps calleux, une commissure formée par plus de 200 millions de fibres nerveuses, qui relie fonctionnellement les deux hémisphères cérébraux⁷. Ainsi, il existe bien une spécialisation hémisphérique chez un sujet normal (pour des synthèses, voir Kosslyn, Gazzaniga, Galaburda & Rabin, 1999; Hugdahl, 2000) mais également une grande communication entre les deux hémisphères, laquelle est perturbée chez les patients callosotomisés (Gazzaniga, 2000).

L'interprétation des travaux sur la spécialisation hémisphérique a donné lieu à de nombreuses exagérations, notamment dans le domaine des méthodes d'apprentissage en éducation. Un élément essentiel sur lequel repose le *neuromythe* relié à la spécialisation hémisphérique est le fait de désigner, soit par l'observation ou par l'utilisation de divers outils psychométriques, une personne comme étant davantage « cerveau droit » et une autre plutôt « cerveau gauche » tout en s'appuyant sur les études mentionnées ci-dessus alors que celles-ci ne s'intéressent aucunement à ce type de dichotomie. Un autre élément à la base du *neuromythe* lié aux hémisphères cérébraux est l'exagération de la latéralisation de certaines fonctions cérébrales. Par exemple, bien que l'expression du langage soit latéralisée dans l'hémisphère gauche, le degré de latéralisation varie considérablement selon la préférence manuelle. Ainsi, environ 4%, 15% et 27% des droitiers, des ambidextres et des gauchers ont respectivement le langage latéralisé à droite (Knecht, Drager, Deppe, Bobe, Lohmann, Floel, Ringelstein *et al.*, 2000). De plus, des fonctions complexes comme le raisonnement spatial ne peuvent être considérées comme entièrement latéralisées dans l'hémisphère droit mais semblent plutôt le fruit d'une interaction entre les deux hémisphères (Chabris & Kosslyn, 1998). Ainsi, suggérer à des enseignants d'adapter leurs méthodes d'apprentissage afin de stimuler correctement les hémisphères cérébraux (e.g. Dennison & Dennison, 1992; Sousa, 1995; Smith, 1996) ne relève d'aucune façon des neurosciences mais plutôt d'une extrapolation abusive des résultats expérimentaux obtenus dans le domaine de la spécialisation hémisphérique (voir OCDE, 2002; Goswami, 2004, 2006; Geake, 2008 pour des critiques similaires).

7. Chez le sujet normal, l'information visuelle présentée dans un hémichamp est d'abord analysée dans l'hémisphère opposé et transférée en quelques millisecondes vers l'autre hémisphère par l'entremise des fibres calleuses.



Apprentissage et préférences de modalités

Un autre exemple de modèle visant à identifier le style d'apprentissage d'un apprenant et à modifier l'enseignement pour mieux y répondre soutient que différents profils peuvent être caractérisés par une préférence basée sur les modalités sensorielles (e.g. Dunn, Dunn & Price, 1975-1997; Smith, 1996; Carbo, 1995). Ainsi, de nombreux outils de mesure ont été utilisés afin de déterminer si les préférences d'un individu pourraient davantage se révéler visuelles, auditives, ou kinesthésiques (VAK). Il est toutefois difficile de déterminer avec précision l'origine exacte de cette approche. Dans une interrogation similaire, Sharp, Bowker et Byrne (2008) retracent en partie l'origine de l'approche VAK au travers des travaux de Smith (e.g. Smith, 1996, 1998; Smith & Call 1999, 2001), lesquels font explicitement référence à la programmation neurolinguistique, un modèle de la communication interpersonnelle originalement développé par Bandler et Grinder (1975; Brandler, Grinder & Andreas, 1979). Cette approche, souvent critiquée pour son manque de rigueur scientifique (e.g. Elich Thompson & Miller, 1985; Sharpley, 1984, 1987), n'a de « neuro » que le nom puisque son fondement ne s'appuie aucunement sur les recherches en neurosciences (Corballis, 1999)⁸. Dans le milieu de l'éducation en Europe, La Garanderie (1982) accorde également une importance particulière aux différences entre les individus prétendus visuels et auditifs. Dans une section intitulée « La bioélectricité du cerveau », l'auteur fait référence à une étude qui aurait mis en évidence des profils d'activités cérébrales propres aux individus visuels et auditifs (p. 124). Or, outre le nom des collaborateurs présumés (P. Laget & J. Creff), aucune référence n'est citée par rapport à cette étude⁹. On parvient notamment à dresser un certain parallèle entre la présumée dichotomie visuels - auditifs et le *neuromythe* des cerveaux gauche et droit lorsque l'auteur mentionne :

[...] le visuel a plus d'esprit critique, l'auditif plus d'esprit de conciliation, d'harmonisation. L'auditif est facilement dupe de ses oreilles, le visuel ne l'est pas de ses yeux. L'auditif aime se concilier les êtres et les choses. Le visuel préfère se maintenir à distance. (p. 128).

Un des modèles les plus populaires comprenant une partie importante dédiée aux préférences de modalités sensorielles est celui proposé par Dunn *et al.* (1975-1997; voir aussi Carbo, 1995). Cette approche très répandue aux Etats-Unis est aussi utilisée par de nombreux intervenants d'autres pays (Coffield *et al.*, 2004) tout en faisant l'objet de nombreuses critiques, tant au niveau des bases théoriques qui sous-tendent le modèle qu'au niveau de son efficacité à favoriser l'apprentissage (Stahl, 1999;

8. Chercheur en neurosciences et Professeur à l'Université d'Auckland, Michael Corballis mentionne que « la programmation neuro-linguistique est un titre fortement trompeur visant à donner l'impression d'une rigueur scientifique » (p. 41, traduction libre).

9. Les moteurs de recherche PubMed, PsycINFO et Eric ne mentionnent aucune étude de la sorte publiée par ces auteurs, ni par d'autres auteurs.



Coffield *et al.*, 2004; Geake, 2008). Le type d'approche VAK constitue un *neuromythe* dans la mesure où l'on prétend que cette approche est basée sur des recherches en neurosciences, lesquelles sont, à notre connaissance, inexistantes. En d'autres termes, peut-être existe-t-il des individus davantage enclins à apprendre à partir d'une approche visuelle, auditive ou kinesthésique mais cette hypothèse ne trouve pas de fondement dans le domaine des neurosciences. Malgré tout, certains auteurs qui accordent une importance aux préférences individuelles de modalité sensorielles (e.g. La Garanderie, 1982; Dunn *et al.*, 1975-1997; Carbo, 1995; Smith, 1996, 1998; Smith & Call, 1999) font souvent référence aux recherches sur le cerveau afin de soutenir leur point de vue. Coffield *et al.* (2004) mentionnent que « [...] les références aux recherches sur le cerveau [...] et les préférences de modalités du modèle de Dunn se situent souvent au niveau de la croyance populaire et ne sont pas soutenues par une évidence scientifique. (p. 33) ». Ainsi, nous pensons qu'il n'y a pas lieu d'utiliser l'expression « brain-based » pour le type d'approche VAK.

Si les approches pédagogiques qui tentent d'identifier une préférence de modalité chez les étudiants ne sont pas fondées sur des recherches en neurosciences cognitives, cela ne signifie pas pour autant qu'elles ne puissent pas favoriser l'apprentissage de manière efficace. Il semblerait plutôt attrayant de préconiser une approche qui tienne compte des préférences de l'élève afin de mieux comprendre ses besoins et ainsi favoriser son apprentissage. Tel est le concept de base de la pédagogie différenciée (voir Perrenoud, 2008, pour une approche actuelle). L'identification des préférences de modalités et l'emploi de méthodes instructives adaptées à celles-ci peuvent-elles contribuer à un meilleur apprentissage ? Certaines études ont tenté de catégoriser les sujets selon leur préférence de modalité (e.g. visuel ou auditif) pour ensuite adapter une méthode d'apprentissage (notamment de la lecture) selon les préférences identifiées. Des méta-analyses et revues de synthèses de ces études révèlent que, pour la grande majorité des études, l'utilisation d'une stratégie instructive adaptée aux préférences de modalités améliore très rarement les performances des sujets (Tarver & Dawson, 1978; Arter & Jenkins, 1979; Kampwith & Bates, 1980; Kavale & Forness, 1987; Stahl, 1999). De plus, une étude récente montre que le profil de préférence sensoriel VAK n'est pas lié aux performances obtenues dans des tests de mémoire visuelle, auditive ou kinesthésique (Kratzig & Arbuthnott, 2006). À la lumière de ces résultats, il semble que l'identification des préférences de modalités ne soit pas une approche ayant reçu beaucoup de supports empiriques pour favoriser l'apprentissage, tout au moins dans les domaines de la lecture et de la mémoire. Aussi, nos recherches de littérature scientifique nous portent à croire que l'intérêt vis-à-vis d'une telle approche a tendance à diminuer depuis plusieurs années. Ces résultats négatifs soulèvent toutefois plusieurs problèmes d'interprétation. Les qualités psychométriques (telles que la fidélité et la validité) des différents outils utilisés afin de déterminer les préférences de modalités pourraient être susceptibles d'expliquer une partie des résultats. L'étude de Kratzig & Arbuthnott



(2006) a utilisé le *Barsch Learning Style Inventory* (Barsh, 1991) comme outil de mesure, outil pour lequel il n'existe pourtant aucune mesure psychométrique publiée. Les auteurs ont calculé l'indice de Cronbach pour leur échantillon et les résultats sont faibles ($\alpha = .54, .56$ et $.38$ respectivement, pour les modalités visuelles, auditives et kinesthésiques). La validité des instruments développés par Dunn *et al.* (*Learning Style Inventory*; 1975-1997) et par Carbo (*Reading Style Inventory*; 1995) a souvent été mise en doute par le fait que les études qui l'ont établie sont pour la plupart le fruit de travaux non publiés et effectués par leurs propres étudiants (Snider, 1992; Stahl, 1999; Coffield *et al.*, 2004). Ainsi, selon Knapp (1994, cité par Coffield *et al.*, 2004, p. 28), le *Learning Style Inventory* constitue un « désastre psychométrique » (p. 28)¹⁰.

Malgré ses origines incertaines et le manque d'appui empirique concernant son efficacité à favoriser l'apprentissage, l'approche VAK demeure aujourd'hui bien présente dans le domaine de l'enseignement (Sharp *et al.*, 2008). Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'approche VAK n'est pas « *brain-based* » et constitue un *neuromythe* dans le cas où l'on prétend que des résultats dans le domaine des neurosciences appuient une telle approche. Ainsi, Sharp *et al.* (2008) soulignent, à propos de l'approche VAK de Smith (Smith, 1996; 1998; Smith & Call, 1999; 2001) que : « les fondements théoriques basés sur le cerveau qui sous-tendent son travail sont entièrement sans fondements »¹¹.

Synaptogenèse et « périodes critiques »

Un autre champ d'étude à l'origine d'un *neuromythe* se situe au niveau de la synaptogenèse et des périodes dites critiques du développement. La synaptogenèse constitue une étape du développement cérébral au cours de laquelle les contacts synaptiques¹² se multiplient abondamment. Chez l'humain, le début de cette période est estimée au cours du troisième trimestre de gestation et se termine vers la fin de la deuxième année post-natale (bien que des différences importantes soient observées entre diverses régions du cerveau). Cette période est caractérisée par une surproduction de contacts synaptiques suivie d'une phase d'élimination au terme de laquelle environ 60% des synapses initiales auront disparu (Huttenlocher & Dabholkar, 1998). Des comparaisons entre différentes régions du cerveau montrent d'importantes différences. Dans le cortex auditif, la densité synaptique atteint son maximum autour des 12 mois chez l'enfant, alors que la période d'élimination se termine à la préadolescence, aux environs de 12 ans. L'évolution semble beaucoup plus

10. Traduction libre.

11. Traduction libre.

12. Une synapse est un contact fonctionnel entre deux neurones, généralement effectué par l'entremise d'un agent chimique (neurotransmetteur). Sur la base de plusieurs recherches animales, des chercheurs ont émis l'hypothèse selon laquelle la plasticité synaptique (la formation et l'élimination sélective de certaines synapses) constituerait un phénomène déterminant pour la mémoire et l'apprentissage (voir Kandel, 2001).



lente au niveau du cortex préfrontal pour lequel la densité synaptique atteint son maximum vers les 15 mois post-natal, avec une période d'élimination qui se poursuit jusqu'à l'adolescence (Huttenlocher & Dabholkar, 1998). Le développement des circuits neuronaux est vraisemblablement le fruit d'une interaction complexe entre les composantes génétiques et l'environnement (e.g. Suomi, 2003). Ainsi, certains systèmes neuronaux requièrent une stimulation lors d'une période précise du développement, sans quoi le système pourrait être affecté de façon plus ou moins permanente. Dans une série d'études animales, Hubel et Wiesel (1970) ainsi que d'autres auteurs (e.g. Horton & Hocking, 1998) ont démontré que l'expérience visuelle en bas âge est nécessaire au bon développement du système visuel. Ainsi, si l'on obstrue un œil tôt dans le développement (privant ainsi l'animal d'une expérience visuelle *via* cet œil) certaines anomalies anatomiques et physiologiques sont observées, non pas au niveau de l'œil lui-même ni de la rétine, mais plutôt au niveau des régions visuelles du cerveau (Hubel & Wiesel, 1970; Hubel, Wiesel & Levay, 1977). L'animal développe ainsi une amblyopie (perte d'acuité visuelle) de l'œil obstrué, due au développement cérébral anormal et ce, de façon irréversible. Au contraire, si l'on obstrue un œil chez l'adulte, même pendant une longue période, cela a peu d'effet à long terme sur la vision et sur l'organisation des régions visuelles du cerveau (Hubel & Wiesel, 1970). Il existe donc, autant chez l'animal que chez l'humain, une période dite « critique » ou « sensible »¹³ durant laquelle une stimulation adéquate est nécessaire au bon développement du système visuel. Cette notion de « période critique » est à la base du *neuromythe* lié à la synaptogenèse. De façon générale, ce *neuromythe* provient encore une fois d'une extrapolation abusive des résultats expérimentaux et soutient que l'enseignement de certaines compétences doit s'effectuer pendant la synaptogenèse (i.e. pendant les deux premières années post-natales), ou encore durant une période critique afin que l'individu puisse mieux apprendre (voir Bruer, 1999 pour une critique). Il est important de noter que certains chercheurs ayant étudié de façon rigoureuse les changements anatomiques du cerveau en développement ont parfois tendance à extrapoler leurs résultats au-delà des faits établis. Auteur de nombreuses publications dans le domaine du développement du cortex cérébral, Jay Giedd explique le principe du « utilisez-le ou perdez-le »¹⁴ en mentionnant que : « si un adolescent pratique la musique ou des sports, ce sont ces cellules et ces contacts qui deviendront solidifiés. S'il demeure sur le canapé, qu'il joue à des jeux vidéos [...] ce sont ces cellules qui survivront »¹⁵. Elizabeth Sowell (citée par Powell, 2006), collaboratrice de Giedd, précise que : « Jay [Giedd] aime mentionner

13. Des études animales suggèrent une différence entre périodes « sensible » et « critique ». Une période sensible est une période durant laquelle les circuits neuronaux sont particulièrement influencés par l'expérience. Toutefois, celle-ci continue d'influencer ces réseaux au cours du développement. Une période critique requiert pour sa part une stimulation particulière pour permettre un développement normal (Knudsen, 1999).

14. « Use it or lose it » ; traduction libre.



« utilisez-le ou perdez-le » et que nous devrions placer les enfants dans des environnements enrichis. Intuitivement cela fait parfaitement sens, mais nous ne possédons pas les données pour faire une telle affirmation »¹⁶. Un bon exemple de ce type de *neuromythe* découle du soi-disant « effet Mozart » et des fausses interprétations qui ont suivi sa description. L'effet Mozart a été décrit par Rauscher, Shaw et Ky (1993). Dans cette étude effectuée sur de jeunes adultes, les auteurs démontrent que le fait d'écouter une sonate de Mozart pendant 10 minutes augmente de façon temporaire (entre 10 et 15 minutes) la performance à un subséquent test visuo-spatial. Plusieurs études ont tenté de reproduire ces résultats avec plus ou moins de succès (voir Chabris, 1999 pour une méta-analyse de 16 études). De façon générale, ces études montrent des effets non significatifs, d'environ 25% plus modestes que celui originalement décrit par Rauscher *et al.* (1993). Une première exagération de cette étude a été de propager l'idée que d'écouter une sonate de Mozart « rendait plus intelligent »¹⁷, alors que la méta-analyse de Chabris et Kosslyn (1998) montre que ce n'est clairement pas le cas. Par la suite, certains ont prétendu que les enfants en bas âge (i.e. pendant la période de synaptogenèse) qui écoutaient de la musique classique pourraient développer une plus grande intelligence. C'est le cas de l'ancien gouverneur de l'Etat de Géorgie, Zell Miller, qui n'a pas hésité à investir la somme de 105'000 dollars US pour offrir à toutes les femmes de l'Etat venant d'accoucher un compact-disc de musique classique destiné aux nouveaux-nés et censé favoriser leur développement. Miller souligne même que « personne ne met en doute le fait que d'écouter de la musique en très bas âge affecte le raisonnement spatial et temporel qui sous-tend les mathématiques, l'ingénierie et même les échecs »¹⁸. Le *neuromythe* lié à la synaptogenèse est d'autant plus évident lorsqu'il ajoute que « faire écouter à cet enfant une musique apaisante aide à développer ces trillions de contacts dans le cerveau ».

Cet exemple illustre bien comment un manque de connaissances scientifiques peut facilement mener à de fausses croyances. L'idée d'une production initiale de contacts synaptiques dont il faut conserver le plus grand nombre par différentes stimulations précoces afin d'éviter de perdre définitivement certains potentiels est fausse. D'abord, l'élagage d'un grand nombre de contacts synaptiques constitue une étape nécessaire au développement. Une élimination synaptique insuffisante pourrait

15. Traduction libre. Entrevue accordée à Public Broadcasting Service (PBS). Disponible sur internet à l'adresse : <http://www.pbs.org/wgbh/pages/frontline/shows/teenbrain/interviews/giedd.html> (consulté le 15 avril 2010).

16. Traduction libre.

17. A titre d'exemple, le critique musical Alex Ross du New-York Time publie le 28 août 1994 un article dans lequel il cite : « des chercheurs [...] ont démontré que d'écouter du Mozart vous rend plus futé » (traduction libre).

18. Traduction libre. Sack, K. Georgia's Governor Seeks Musical Start for Babies. New York Time, 15 jan 1998, p. A12. Disponible sur internet à l'adresse : <http://query.nytimes.com/gst/fullpage.html?res=9F0DE4DA1E39F936A25752C0A96E958260> (consulté le 15 avril 2010).



en réalité être à la base des déficits cognitifs associés à certaines maladies génétiques comme le *syndrome de l'X-fragile* (Irwin, Galvez & Greenough, 2000; Churchill, Grossman, Irwin, Galvez, Klintsova, Weiler & Greenough, 2002; Koukoui & Chaudhuri, 2007). Si certaines périodes critiques ont été mises en évidence, notamment au niveau du système visuel, celles-ci sont beaucoup moins évidentes en ce qui concerne le développement des processus cognitifs comme, par exemple, l'acquisition du langage. De plus, contrairement au développement du système visuel, les liens entre les périodes critiques du langage et l'anatomie du cerveau sont beaucoup moins connus. Des études récentes chez le nourrisson appuient l'existence d'une période critique dans l'apprentissage phonétique, laquelle est à la base de l'acquisition du langage (Kuhl, Conboy, Padden, Nelson & Pruitt, 2005). Bien que l'idée d'une contribution des neurosciences du développement au domaine de l'enseignement nous semble attirante, des recherches complémentaires sont nécessaires pour qu'un tel apport soit réellement significatif.

Neurosciences cognitives et éducation : quelques domaines prometteurs

Dans cette section, nous illustrons quelques recherches expérimentales en neurosciences cognitives qui pourraient apporter une contribution significative aux sciences de l'éducation. Bien que notre analyse se limite aux troubles d'apprentissage du langage et à la dyslexie, des liens entre les neurosciences cognitives et l'enseignement commencent également à s'établir dans certains autres domaines (Goswami, 2004; Posner & Rothbart, 2005; Rueda, Rothbart, McCandliss, Saccomanno & Posner, 2005; Golombek & Cardinali, 2008).

Les troubles d'apprentissage du langage

Plusieurs troubles du développement sont souvent associés à des déficits d'apprentissage du langage oral et écrit. Ceux-ci incluent entre autres des syndromes spécifiques associés à un retard mental (syndrome de l'X fragile; Trisomie 21; etc.), les troubles envahissants du développement tels que l'autisme, les troubles d'hyperactivité avec déficit de l'attention et des troubles du système auditif. Une proportion importante des troubles de l'apprentissage du langage n'est cependant associée à aucun autre déficit particulier. Ainsi, environ 7% des enfants d'âge scolaire éprouvent des troubles de développement du langage dont l'origine demeure inconnue (Tomblin, Records, Buckwalter, Zhang, Smith & O'Brien, 1997). Bien que le développement du langage oral présente de nombreuses différences fondamentales par rapport à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, ces deux types d'apprentissage partagent également plusieurs points communs (Tallal & Benasich, 2002). Ainsi, les enfants présentant des troubles du langage seraient à haut risque de rencontrer des difficultés dans l'apprentissage de la lecture (Rissman,



Curtiss & Tallal, 1990; Catts, Bridges, Little & Tromblin, 2008; Pennington & Bishop, 2009). Les experts de l'étude du langage conceptualisent ce processus de façon hiérarchique, c'est-à-dire constitué d'une succession d'analyses de différents aspects du langage, allant du plus élémentaire au plus complexe. La première analyse consiste à identifier les entités de base qui forment et différencient les mots d'une langue (phonèmes¹⁹). Une fois ce processus accompli, des traitements plus complexes (syntaxe, sémantique, discours) du langage peuvent s'effectuer. En d'autres termes, les mots doivent être fractionnés en leurs composantes élémentaires avant de pouvoir être identifiés, mémorisés, etc. Dans le langage oral, la capacité à identifier correctement les phonèmes et à les différencier entre eux requiert notamment une analyse temporelle rapide des sons, laquelle pourrait être à la base des difficultés rencontrées dans les troubles de l'apprentissage du langage (Leonard, 1998). Une hypothèse visant à expliquer les troubles de l'apprentissage du langage soutient que les individus affectés éprouvent de la difficulté à traiter et à produire des événements qui se succèdent rapidement (entre 10ms et 100ms) et ce, indépendamment de la modalité sollicitée (Tallal & Benasich, 2002). Une analyse d'événements acoustiques rapides est nécessaire afin d'identifier ou de différencier correctement certaines composantes fondamentales du langage. Par exemple, si l'on observe le spectre de fréquences sonores produit par les syllabes /ba/ et /da/ (lesquelles peuvent faire la différence entre deux mots; par exemple « bar » et « dard ») dans une phrase prononcée à un rythme normal, on s'aperçoit que la différence entre ces deux syllabes est caractérisée par un rapide changement de fréquences (appelé « formant ») de l'ordre d'environ 40ms (voir Tallal, 2004). Or, les individus avec des troubles d'apprentissage du langage requièrent des différences acoustiques plus longues (entre 100ms et 200ms) afin de différencier correctement les événements (Fitch & Tallal, 2003). Motivés par les résultats d'études animales sur la plasticité cérébrale et l'entraînement, Merzenich, Jenkins, Johnston, Schreiner, Miller et Tallal (1996) se sont intéressés à des enfants présentant des troubles d'apprentissage du langage et les ont soumis à un entraînement intensif effectué à l'aide de stimuli sonores simples. Les résultats suggèrent qu'un tel entraînement puisse produire une amélioration significative de l'analyse temporelle chez ces sujets. A l'aide d'outils informatiques permettant de modifier de courts segments du signal de parole, des chercheurs ont également pu allonger et amplifier certains formants (Tallal & Piercy, 1975; Tallal, Miller, Bedi, Byma, Wang, Nagarajan, Scheiner *et al.*, 1996). Cette emphase artificielle de certaines composantes de la parole permet une meilleure compréhension de la part des enfants présentant des troubles d'apprentissage du langage. De plus, un entraînement, de quelques heures par jour pendant quelques

19. Un phonème est le plus petit segment phonique (dépourvu de sens) permettant seul ou en combinaison avec d'autres phonèmes de constituer des signifiants ou de les distinguer entre eux (Galisson & Coste, 1976). La langue française compte 37 phonèmes.



semaines, effectué à l'aide de ces enregistrements modifiés, augmente significativement les capacités langagières de ces enfants (Tallal *et al.*, 1996). Ces résultats permettent de confirmer que le déficit des sujets se situe effectivement au niveau de l'analyse temporelle rapide. Par ailleurs, des entraînements spécifiques peuvent permettre de réduire considérablement ces déficits, possiblement grâce à des mécanismes de plasticité corticale similaires à ceux qui sont observés dans les études animales (e.g. Recanzone, Schreiner & Merzenich, 1993; Merzenich & Jenkins, 1995).

Dyslexie

La dyslexie est un trouble persistant de l'identification des mots écrits. Elle peut être observée en l'absence de déficit sensoriel, de manque de scolarisation ou de déficit intellectuel. Historiquement appelé « cécité des mots » (Morgan, 1896), ce trouble est aujourd'hui davantage considéré comme ayant une origine phonologique (Snowling, 2000), bien qu'un déficit du système visuel pourrait être également présent dans certains cas (Stein & Walsh, 1997). Alors que, chez l'humain, l'apprentissage du langage parlé pourrait impliquer un traitement phonologique « naturel » (Pinker, 1994; voir aussi Sampson & Postal, 1997 pour une critique), il en est tout autre pour l'apprentissage de la lecture. Selon l'approche phonologique, l'individu qui apprend à lire doit d'abord se sensibiliser aux phonèmes de manière consciente. Aussi, il doit apprendre à associer les lettres qu'il voit (graphèmes) aux phonèmes correspondants afin de maîtriser la structure sonore des mots. L'hypothèse du déficit phonologique soutient qu'une personne dyslexique éprouve des difficultés à se sensibiliser aux phonèmes, ce qui empêche l'identification subséquente des mots écrits. Ainsi, le degré de sensibilisation phonologique est un bon prédicateur de l'acquisition de la lecture (Bradley, 1983; Hatcher, Hulme & Ellis, 1994; Høien, Lundberg, Stanovich & Bjaalid, 1995). Plusieurs études d'activation utilisant la résonance magnétique fonctionnelle (fMRI) ont permis d'identifier les régions du cerveau actives lors d'une tâche de lecture (voir Shaywitz, Morris & Shaywitz, 2007 pour une synthèse). Les résultats de ces études convergent sur trois régions (une antérieure et deux postérieures) de l'hémisphère gauche associées à la lecture : la région de Broca, située dans la partie inférieure du lobe frontal, traditionnellement associée à l'expression du langage; une région située à la jonction temporo-pariétale, impliquée dans l'analyse des mots, et une région à la jonction temporo-occipitale, impliquée dans la lecture fluente. D'autres études montrent que les sujets qui éprouvent des difficultés de lecture ont un profil d'activation différent, marqué par une moindre activation de certaines de ces régions (Shaywitz, Shaywitz, Pugh, Fulbright, Constable, Mencl, Shankweiler *et al.*, 1998; Temple, Deutsch, Poldrack, Miller, Tallal, Merzenich & Gabrieli, 2003; Shaywitz *et al.*, 2007). Ces nouvelles connaissances ont motivé les chercheurs à utiliser des méthodes d'interventions visant à améliorer la sensibilisation phonologique, lesquelles augmentent les performances aux tests de lecture



chez les enfants dyslexiques ou présentant des difficultés à traiter l'information phonologique (e.g. Blachman, Tangel, Ball, Black & McGraw, 1999; Blachman, Schatschneider, Fletcher & Clonan, 2003; Torgesen, Wagner, Rashotte, Rose, Lindamood, Conway & Garvan, 1999; Torgesen, Alexander, Wagner, Rashotte, Voeller & Conway, 2001). Des études d'activation ont mesuré (au cours de l'exécution d'une tâche phonologique) l'activité cérébrale des enfants qui présentent des difficultés de lecture. Une comparaison entre l'activité cérébrale initiale et celle obtenue après un entraînement phonologique a été effectuée. Suite à l'entraînement, une hausse d'activité au niveau des régions cérébrales associées à la lecture est observée, en plus d'une amélioration significative aux tests de lecture (Simos, Fletcher, Bergman, Breier, Foorman, Castillo, Davis *et al.*, 2002; Aylward, Richards, Berninger, Nagy, Field, Grimme, Richards *et al.*, 2003; Temple *et al.*, 2003; Shaywitz, Shaywitz, Blachman, Pugh, Fulbright, Skudlarski, Mencl *et al.*, 2004). Ces résultats suggèrent fortement que des performances phonologiques normales et déficitaires se traduisent par des profils d'activation cérébrale différents, observables pendant l'exécution de la tâche phonologique. De plus, un entraînement phonologique semble être une intervention qui pourrait permettre d'améliorer les performances en lecture et de rétablir la fonctionnalité des réseaux cérébraux associés à cette tâche.

D'autres travaux suggèrent que dans certains cas, le déficit phonologique ne soit pas l'unique raison des problèmes de lectures observés chez les dyslexiques. En effet, des études anatomiques effectuées sur des cerveaux d'individus dyslexiques ont relevé des anomalies au niveau de certaines régions visuelles et auditives (Livingstone, Rosen, Drislane & Galaburda, 1991; Galaburda, Menard & Rosen, 1994; Jenner, Rosen & Galaburda, 1999). Par exemple, la taille des neurones des couches magnocellulaires du corps genouillé latéral²⁰ des dyslexiques semble nettement plus petite que chez les sujets contrôles. Ces observations anatomiques ont incité les chercheurs à évaluer l'intégrité du système magnocellulaire chez des sujets dyslexiques en utilisant différents tests psychophysiques. Ainsi, les individus dyslexiques montrent différents déficits visuels, parfois subtils, qui reflètent un dysfonctionnement spécifique au système magnocellulaire (voir Stein & Walsh, 1997; Stein, 2001 pour des synthèses). Par exemple, les sujets dyslexiques ont davantage de difficulté à détecter des stimuli rapides à bas contrastes, une fonction typiquement attribuée au système magnocellulaire (Lovegrove, Bowling,

20. Le corps genouillé latéral est un noyau du thalamus qui reçoit les projections des cellules ganglionnaires de la rétine. Ce noyau visuel est constitué de six couches de neurones; deux couches dites « magnocellulaires » et quatre couches dites « parvocellulaires ». Ces différentes couches reflètent une organisation parallèle fonctionnelle du système visuel et sont impliquées dans l'analyse de différents attributs de la scène visuelle. Alors que le système parvocellulaire est impliqué dans l'analyse des détails (haute résolution spatiale), de la couleur et des hauts contrastes, le système magnocellulaire est impliqué dans l'analyse des stimuli grossiers se déplaçant rapidement (haute résolution temporelle) et des bas contrastes (voir Livingstone & Hubel, 1988 pour plus de détails).



Badcock & Blackwood, 1980). Bien qu'un lien direct entre un dysfonctionnement magnocellulaire et des troubles de la lecture ne soit pas évident à première vue, plusieurs observations convergent vers cette possibilité (Stein & Walsh, 1997; Stein, 2001). Par exemple, il existe chez les sujets normaux une corrélation entre les performances à des tests qui sollicitent le système magnocellulaire (e.g. test de sensibilité au mouvement) et les performances à certains tests de lecture (Talcott, Hensen, Assoku & Stein, 2000). Un autre déficit visuel qui pourrait être attribuable à un dysfonctionnement magnocellulaire chez certains dyslexiques concerne les mouvements oculaires. En effet, des études suggèrent qu'une proportion importante des individus dyslexiques montre des difficultés de fixation binoculaire, ce qui pourrait expliquer en partie certains déficits de lecture (Stein, 2001). Un moyen très simple pour stabiliser la fixation dans de tels cas est d'obstruer un œil durant une courte période de temps (par exemple, quand la personne effectue une tâche de lecture) afin d'empêcher la confusion due au mauvais contrôle binoculaire. Stein, Richardson et Fowler (2000) ont sélectionné un groupe d'enfants dyslexiques démontrant des troubles du contrôle binoculaire. Les sujets ont reçu pour consigne de porter des lunettes avec un œil obstrué à chaque fois qu'ils effectuaient une tâche de lecture ou d'écriture. Le fait de porter ces lunettes augmente la probabilité de corriger les problèmes de fixation binoculaire et, pour les sujets qui bénéficient de cette correction, des progrès significatifs sont observés aux tests de lecture (Stein, Richardson & Fowler, 2000). En dépit de certaines critiques portées à l'endroit des études supportant l'hypothèse magnocellulaire de la dyslexie (Stein & Fowler, 1981, 1982, 1985; critiqués par Bishop, 1989), ces résultats illustrent le processus par lequel des études anatomiques sur le cerveau ont motivé des interventions concrètes dans le domaine de l'apprentissage. Néanmoins, les résultats des études supportant l'hypothèse magnocellulaire de la dyslexie devraient être dupliqués par d'autres groupes de recherche pour en assurer la pertinence clinique.

Quelle formation pour les enseignants ?

Il semble aujourd'hui important de considérer le potentiel que nous offrent les études en neurosciences cognitives pour l'apport d'une contribution positive au domaine de l'éducation. Cependant, cette nouvelle alliance doit s'établir dans un cadre de co-construction entre les deux domaines d'étude plutôt que dans l'optique d'une implantation trop hâtive des résultats scientifiques en milieu scolaire (Ansari & Coch, 2006). Plusieurs actions pourraient favoriser le développement du dialogue entre les professionnels de l'éducation et les chercheurs en neurosciences cognitives. Des regroupements internationaux comme l'*International Mind, Brain and Education Society* proposent également des congrès et des ateliers visant à favoriser la communication entre les professionnels issus de différents milieux scientifiques et académiques. En plus de permettre aux professionnels de l'éducation l'accès à l'état des



recherches qui intéressent le domaine pédagogique, ces interactions peuvent être très utiles aux chercheurs. En effet, l'expérience de la pratique et la confrontation directe aux problèmes du quotidien en milieu scolaire vécus par les enseignants permettent aux chercheurs de visualiser les champs d'intérêt prometteurs et les modifications qui pourraient améliorer l'enseignement. Ces connaissances constituent un intérêt majeur pour les chercheurs qui souhaitent développer des outils concrets visant à favoriser l'apprentissage.

Une mesure essentielle est de faire bénéficier les enseignants d'une formation de base dans le domaine des neurosciences, avec comme objectif général le développement d'une pensée critique (Pallascio, Daniel & Lafortune, 2004) sur les informations circulant à propos des liens entre le cerveau et l'apprentissage. Plus spécifiquement quatre axes généraux sont proposés et concernent la construction de connaissances de bases dans le domaine des neurosciences, la prévention de l'apparition des *neuromythes*, l'état actuel des recherches sur différents profils associés à des troubles d'apprentissage et l'élaboration d'outils (connaissances, documents, ressources externes, etc.) qui permettent aux enseignants de mieux communiquer avec les parents d'élèves et les professionnels de la santé (voir tableau 1). La formation des enseignants devrait aussi inclure une introduction aux principales approches et techniques utilisées en

Tableau 1 : Dispositif de formation destinée aux enseignants

Axes de formation	Contenu
1. Connaissances de base en neuroscience	<ul style="list-style-type: none">• Le neurone, l'influx nerveux et la transmission synaptique• Le cerveau : regard anatomo-fonctionnel• Le cortex cérébral, les fonctions supérieures
2. Les <i>neuromythes</i>	<ul style="list-style-type: none">• La latéralisation hémisphérique : faits et interprétations• Le développement et la plasticité cérébrale• Différencier les écrits scientifiques et non-scientifiques
3. Recherches actuelles sur les troubles d'apprentissage	<ul style="list-style-type: none">• Hyperactivité / déficit de l'attention• Autisme• Problèmes de langage• Dyslexie• Mécanismes d'action des principaux médicaments
4. Recherche de documentation	<ul style="list-style-type: none">• Utilisation des moteurs de recherche bibliographique• Lectures et discussions en groupe• Développement d'un esprit critique



neurosciences cognitives (tests psychométriques, imagerie fonctionnelle, potentiels évoqués, études animales, etc.).

Des formateurs, idéalement des scientifiques habiles à la vulgarisation, pourraient à travers ce type d'activité soutenir les enseignants qui portent un intérêt particulier aux recherches reliées à leurs activités professionnelles (Goswami, 2006). Ceci augmenterait leur autonomie à rechercher et à assimiler l'information scientifique pertinente à la dimension neuropsychologique de l'apprentissage. Afin de rendre cette démarche possible, les professionnels de l'éducation devraient être initiés à l'utilisation de bases de données (*PubMed*, *Eric* etc.) et pouvoir bénéficier d'un accès aux articles qui les intéressent.

Dans le cadre d'un cours portant sur les neurosciences cognitives dans le domaine de l'éducation, les interactions avec les participants (enseignants et futurs enseignants) ont révélé un réel intérêt pour le sujet. Cependant, et alors que certaines croyances semblent propices à des remises en question chez certains participants, il apparaît clairement que cette démarche peut parfois engendrer de fortes résistances. À titre d'exemple, la majorité des enseignants ont affirmé connaître BrainGym® et quelques-uns d'entre eux utilisaient régulièrement cette pratique. Bien que des discussions relatives à l'absence de fondements scientifiques pouvant soutenir ces exercices soient reçues de façon positive, l'abandon de leurs utilisations semble plus difficile à obtenir. Ainsi, certains enseignants acceptent l'idée que BrainGym® est sans fondement scientifique (alors que de nombreuses références au cerveau y sont mentionnées) mais ils souhaitent continuer à l'utiliser puisque « c'est sans danger » et « les élèves aiment ces activités ». Le danger n'est bien entendu pas physique mais il se situe davantage au niveau de la construction de fausses croyances liées au fonctionnement du corps. Ces fausses croyances véhiculées dans l'ouvrage de Dennison et Dennison (1992) pourraient se révéler plus ou moins difficiles à déconstruire au profit de connaissances avérées sur le fonctionnement cérébral. D'autre part, le modèle VAK semble particulièrement difficile à remettre en cause chez ceux qui y adhèrent (dans notre public d'enseignants, il s'agit surtout de la distinction entre visuels et auditifs véhiculée par le modèle de La Garanderie). Ainsi, après la présentation des multiples résultats empiriques démontrant l'inefficacité générale d'une approche VAK (ou visuelle-auditive) à favoriser l'apprentissage (e.g. Snider, 1992; Stahl, 1999), une étudiante exprime la remarque suivante : « oui d'accord mais, La Garanderie a montré qu'il y a bien des personnes visuelles et auditives... ». Cet exemple démontre que les connaissances basées sur des données empiriques et construites en cours par les étudiants, ne suffisent pas pour autant à susciter une remise en question de leurs croyances, lesquelles ne sont pourtant pas fondées sur des garanties épistémiques. Nous rejoignons ici les travaux sur le rôle prépondérant des croyances au détriment des connaissances chez les enseignants (pour une revue, voir Doudin, Pons & Martin, 2003). Les croyances seraient issues de



l'expérience personnelle, elles comportent une dimension affective et de jugement ce qui explique en partie leur stabilité, voire leur rigidité au contraire des connaissances qui peuvent faire plus facilement l'objet d'une évaluation critique et d'une remise en question. Un mythe, ici un *neuromythe*, a sans doute un statut de croyance. Dans une formation abordant les *neuromythes*, il conviendrait d'en tenir compte dès le début de la formation et d'accompagner les enseignants dans une prise de conscience de leurs croyances pour les opposer aux connaissances reposant sur une validité épistémique. Il est possible que le conflit cognitif ainsi suscité puisse permettre une remise en cause de certaines croyances du professionnel de l'enseignant.

Ce nouveau domaine d'étude, soit l'alliance entre les neurosciences cognitives et les sciences de l'éducation doit d'abord s'établir au travers du dialogue. Une attitude optimiste est de rigueur, mais comme dans tout nouveau domaine, les participants devront faire preuve de patience et fournir plusieurs efforts de collaboration avant que l'on puisse parler d'une réelle synergie entre neurosciences et pédagogie.



Références

- Ansari, D. & Coch, D. (2006). Bridges over troubled waters: Education and cognitive neuroscience. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 146-151.
- Arter, J. & Jenkins, J. (1979). Differential diagnosis prescriptive teaching: A critical appraisal. *Review of Educational Research*, 49, 517-555.
- Aylward, E., Richards, T., Berninger, V., Nagy, W., Field, K., Grimme, A., Richards, A., et al. (2003). Instructional treatment associated with changes in brain activation in children with dyslexia. *Neurology*, 61, 212-219.
- Bandler, R. & Grinder, J. (1975). *The structure of magic: A book about language and therapy*. Palo Alto CA: Science & Behavior Books.
- Bandler, R., Grinder, J. & Andreas, S. (1979). *Frogs into princes: Neuro linguistic programming*. Real People Press Moab, UT.
- Barsch, J. (1991). *Barsch learning style inventory*. Novato, CA: Academic Therapy Publications.
- Bishop, D. (1989). Unfixed reference, monocular occlusion, and developmental dyslexia—a critique. *British Medical Journal*, 73, 209-215.
- Blachman, B., Schatschneider, C., Fletcher, J. & Clonan, S. (2003). Early reading intervention: A classroom prevention study and a remediation study. In B. R. Foorman (Ed.), *Preventing and remediating reading difficulties: Bringing science to scale* (pp. 253-271). Timonium, MD: York Press.
- Blachman, B., Tangel, D., Ball, E., Black, R. & McGraw, C. (1999). Developing phonological awareness and word recognition skills: A two-year intervention with low-income, inner-city children. *Reading and Writing*, 11, 239-273.
- Bradley, L. (1983). Categorizing sounds and learning to read: A causal connection. *Nature*, 301, 419-421.
- Bruer, J. (1997). Education and the brain: A bridge too far. *Educational Researcher*, 26, 4-16.
- Byrnes, J. & Fox, N. (1998). The educational relevance of research in cognitive neuroscience. *Educational Psychology Review*, 10, 297-342.
- Carbo, M. (1995). *Reading Style Inventory Manual*. Syosset, NY: National Reading Styles Institute.
- Catts, H., Bridges, M., Little, T. & Tomblin, J. (2008). Reading achievement growth in children with language impairments. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 51, 1569-1579.
- Chabris, C. (1999). Prelude or requiem for the 'Mozart effect'? *Nature*, 400, 826-827.
- Chabris, C. & Kosslyn, S. (1998). How Do the Cerebral Hemispheres Contribute to Encoding Spatial Relations? *Current Directions in Psychological Science*, 7, 8-14.
- Churchill, J., Grossman, A., Irwin, S., Galvez, R., Klintsova, A., Weiler, I. & Greenough, W. (2002). A converging-methods approach to fragile X syndrome. *Developmental psychobiology*, 40, 323-338.
- Coffield, F., Moseley, D., Hall, E. & Ecclestone, K. (2004). *Learning styles and pedagogy in post-16 learning: A systematic and critical review*. Learning and Skills Research Centre. Trowbridge, UK: Cromwell Press.
- Corballis, M. (1999). Are we in our right minds? In S. Della Salla (Ed.), *Mind myths: exploring popular assumptions about the mind and brain*. Chichester, UK: Wiley, John & Sons.
- Dennison, P. & Dennison, G. E. (1992). *Le mouvement clé de l'apprentissage: Brain gym*. Barret-sur-Méouge: Le Souffle d'Or.
- Doudin, P., Pons, F. & Martin, D. (2003). Croyances et connaissances : analyse de deux types de rapports au savoir. In L. Lafortune, C. Deaudelin, P.-A. Doudin & D. Martin (Ed.) *Conception, Croyances et représentations en mathématiques, sciences et technologies* (pp. 29-57). Sainte-Foy, Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Dunn, K., Dunn, R. & Price, G. (1975). *Learning styles inventory*. Lawrence, KS: Price Systems.



- Elich, M., Thompson, R. & Miller, L. (1985). Mental imagery as revealed by eye movements and spoken predicates: A test of neurolinguistic programming. *Journal of Counseling Psychology, 32*, 622-625.
- Fitch, R. & Tallal, P. (2003). Neural mechanisms of language-based learning impairments: insights from human populations and animal models. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews, 2*, 155-178.
- Galaburda, A., Menard, M. & Rosen, G. (1994). Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 91*, 8010-8013.
- Galisson, R. & Coste, D. (1976). *Dictionnaire de didactique des langues: la conception de l'ensemble de l'ouvrage*. Paris: Hachette.
- Gazzaniga, M. (2000). Cerebral specialization and interhemispheric communication: Does the corpus callosum enable the human condition? *Brain, 123*, 1293-1326.
- Gazzaniga, M. (2005). Forty-five years of split-brain research and still going strong. *Nature Reviews Neuroscience, 6*, 653-659.
- Gazzaniga, M., Bogen, J. & Sperry, R. (1965). Observations on visual perception after disconnection of the cerebral hemispheres in man. *Brain, 88*, 221-236.
- Geake, J. (2008). Neuromythologies in education. *Educational Research, 50*, 123-133.
- Golombek, D. & Cardinali, D. (2008). Mind, brain, education, and biological timing. *Mind, Brain, and Education, 2*, 1-6.
- Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: from research to practice? *Nature Reviews Neuroscience, 7*, 406-413.
- Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology, 74*, 1-14.
- Hatcher, P., Hulme, C. & Ellis, A. (1994). Ameliorating early reading failure by integrating the teaching of reading and phonological skills: The phonological linkage hypothesis. *Child Development, 65*, 41-57.
- Høien, T., Lundberg, I., Stanovich, K. & Bjaalid, I. (1995). Components of phonological awareness. *Reading and Writing, 7*, 171-188.
- Horton, J. & Hocking, D. (1998). Monocular core zones and binocular border strips in primate striate cortex revealed by the contrasting effects of enucleation, eyelid suture, and retinal laser lesions on cytochrome oxidase activity. *Journal of Neuroscience, 18*, 5433-5455.
- Hubel, D. & Wiesel, T. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *The Journal of physiology, 206*, 419-436.
- Hubel, D., Wiesel, T. & LeVay, S. (1977). Plasticity of ocular dominance columns in monkey striate cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 278*, 377-409.
- Hugdahl, K. (2000). Lateralization of cognitive processes in the brain. *Acta psychologica, 105*, 211-235.
- Huttenlocher, P. & Dabholkar, A. (1998). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *The Journal of comparative neurology, 387*, 167-178.
- Irwin, S., Galvez, R. & Greenough, W. (2000). Dendritic spine structural anomalies in fragile-X mental retardation syndrome. *Cerebral Cortex, 10*, 1038-1044.
- Jenner, A., Rosen, G. & Galaburda, A. (1999). Neuronal asymmetries in primary visual cortex of dyslexic and nondyslexic brains. *Annals of Neurology, 46*, 189-196.
- Kampwirth, T. & Bates, M. (1980). Modality preference and teaching method: A review of the research. *Intervention in School and Clinic, 15*, 597-605.
- Kandel, E.R. (2001). The molecular biology of memory storage: a dialog between genes and synapses. *Science, 294*, 1030-1038.
- Kavale, K. & Forness, S. (1987). Substance over style: Assessing the efficacy of modality testing and teaching. *Exceptional Children, 54*, 228-239.
- Knapp, T. (1994). Review of the Learning Styles Inventory. In J.C. Impara & B. S. Blake (Ed.), *The thirteenth mental measurements yearbook*. Lincoln, NE: Buros Institute of Mental Measurements.



- Knecht, S., Drager, B., Deppe, M., Bobe, L., Lohmann, H., Floel, A., Ringelstein, E., *et al.* (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123, 2512-2518.
- Knudsen, E. (1999). Early experience and critical periods. In M. J. Zigmond, F. E. Bloom, S. C. Landis, J. L. Roberts & L. R. Squire (Ed.), *Fundamental neuroscience*. San Diego, CA: Academic Press.
- Kosslyn, S., Gazzaniga, M., Galaburda, A. & Rabin, C. (1999). Hemispheric specialization. In M. J. Zigmond, F. E. Bloom, S. C. Landis, J. L. Roberts & L. R. Squire (Ed), *Fundamental neuroscience*. San Diego, CA: Academic press.
- Koukoui, S. & Chaudhuri, A. (2007). Neuroanatomical, molecular genetic, and behavioral correlates of fragile X syndrome. *Brain Research Reviews*, 53, 27-38.
- Kratzig, G. & Arbuthnott, K. (2006). Perceptual learning style and learning proficiency: A test of the hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, 98, 238-246.
- Kuhl, P., Conboy, B., Padden, D., Nelson, T. & Pruitt, J. (2005). Early Speech Perception and Later Language Development: Implications for the « Critical Period ». *Language Learning and Development*, 1, 237-264.
- La Garanderie, A. (1982). *Pédagogie des moyens d'apprendre*. Paris: Bayard.
- Leonard, L. (1998). *Children with specific language impairment*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Livingstone, M. & Hubel, D. (1988). Segregation of form, color, movement, and depth: anatomy, physiology, and perception. *Science*, 240, 740-749.
- Livingstone, M., Rosen, G., Drislane, F. & Galaburda, A. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 88, 7943-7947.
- Lovegrove, W., Bowling, A., Badcock, D. & Blackwood, M. (1980). Specific reading disability: differences in contrast sensitivity as a function of spatial frequency. *Science*, 210, 439-440.
- Merzenich, M. & Jenkins, W. (1995). Cortical plasticity, learning, and learning dysfunction. In B. Julesz & I. Kovacs (Ed.), *Maturational windows and adult cortical plasticity*. Santa Fe, NM: Addison-Wesley.
- Merzenich, M., Jenkins, W., Johnston, P., Schreiner, C., Miller, S. & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271, 77-81.
- Morgan, W. (1896). A case of congenital word blindness. *British Medical Journal*, 2, 1378-1379.
- OCDE. (2002). *Comprendre Le Cerveau: Naissance D'une Science De L'apprentissage*. Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement. Disponible sur ocde.org.
- Pallascio, R., Daniel, M. & Lafortune, L. (2004). *Pensée et réflexivité: théories et pratiques*. Québec: Presses de l'Université du Québec.
- Pennington, B. & Bishop, D. (2009). Relations among speech, language, and reading disorders. *Annual review of psychology*, 60, 283-306.
- Perrenoud, P. (2008). *La pédagogie différenciée. Des intentions à l'action*, Issy-les-Moulineaux, ESF.
- Pinker, S. (1994). *The Language Instinct*. New York: William Morrow and Company. Inc.
- Posner, M. & Rothbart, M. (2005). Influencing brain networks: implications for education. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 99-103.
- Powell, K. (2006). Neurodevelopment: How does the teenage brain work? *Nature*, 442, 865-867.
- Rauscher, F., Shaw, G. & Ky, K. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365, 611.
- Recanzone, G., Schreiner, C. & Merzenich, M. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *Journal of Neuroscience*, 13, 87-103.
- Rissman, M., Curtiss, S. & Tallal, P. (1990). School placement outcomes of young language impaired children. *Journal of speech - language pathology and audiology*, 14, 49-58.



- Rueda, M., Rothbart, M., McCandliss, B., Saccomanno, L. & Posner, M. (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 14931-14936.
- Sampson, G. & Postal, P. (2005). *The language instinct debate*. London: Burns & Oates.
- Sharp, J., Bowker, R. & Byrne, J. (2008). VAK or VAK-uous? Towards the trivialisation of learning and the death of scholarship. *Research Papers in Education*, 23, 293-314.
- Sharpley, C. (1984). Predicate matching in nlp: A review of research on the preferred representational system. *Journal of Counseling Psychology*, 31, 238-248.
- Sharpley, C. (1987). Research findings on neuro-linguistic programming: Non supportive data or an untestable theory. *Journal of Counseling Psychology*, 34, 103-107.
- Shaywitz, B., Shaywitz, S., Blachman, B., Pugh, K., Fulbright, R., Skudlarski, P., Mencl, W. et al. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biological Psychiatry*, 55, 926-933.
- Shaywitz, S., Morris, R. & Shaywitz, B. (2007). The education of dyslexic children from childhood to young adulthood. *Annual Review of Psychology*, 59, 451-475.
- Shaywitz, S., Shaywitz, B., Pugh, K., Fulbright, R., Constable, R., Mencl, W., Shankweiler, D. et al. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 2636-2641.
- Simos, P., Fletcher, J., Bergman, E., Breier, J., Foorman, B., Castillo, E., Davis, R. et al. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58, 1203-1213.
- Smith, A. (1998). *Accelerated Learning in Practice: Brain-based methods for accelerating motivation and achievement*. Stafford: Network Educational Press.
- Smith, A. (1996). *Accelerated learning in the classroom*. Stafford: Network Educational Press.
- Smith, A. & Call, N. (1999). *The alps approach: accelerated learning in primary schools*. Stafford: Network Educational Press.
- Smith, A. & Call, N. (2001). *The alps approach resource book*. Stafford: Network Educational Press.
- Snider, V. (1992). Learning styles and learning to read: A critique. *Remedial and Special Education*, 13, 6-18.
- Snowling, M. (2000). *Dyslexia*. Oxford, UK: Blackwell.
- Sousa, D. (1995). *How the brain learns: A classroom teacher's guide*. Reston, VA: National Association of Secondary School Principals.
- Stahl, S. (1999). Different strokes for different folks. *American Educator*, 23, 27-31.
- Stein, J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, 7, 12-36.
- Stein, J. & Fowler, S. (1985). Effect of monocular occlusion on visuomotor perception and reading in dyslexic children. *The Lancet*, 326, 69-73.
- Stein, J. & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, 20, 147-152.
- Stein, J. & Fowler, S. (1982). Diagnosis of dyslexia by means of a new indicator of eye dominance. *British Medical Journal*, 66, 332-336.
- Stein, J., Richardson, A. & Fowler, M. (2000). Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain*, 123, 164-170.
- Suomi, S. (2003). Gene-environment interactions and the neurobiology of social conflict. *Annual New York Academy of Science*, 1008, 132-139.
- Talcott, J., Hansen, P., Assoku, E. & Stein, J. (2000). Visual motion sensitivity in dyslexia: evidence for temporal and energy integration deficits. *Neuropsychologia*, 38, 935-943.
- Tallal, P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 721-728.
- Tallal, P. & Benasich, A. (2002). Developmental language learning impairments. *Development and psychopathology*, 14, 559-579.
- Tallal, P., Miller, S., Bedi, G., Byma, G., Wang, X., Nagarajan, S., Schreiner, C. et al. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, 271, 81-84.



- Tallal, P. & Piercy, M. (1975). Developmental aphasia: The perception of brief vowels and extended stop consonants. *Neuropsychologia*, *13*, 69-74.
- Tarver, S. & Dawson, M. (1978). Modality preference and the teaching of reading: A review. *Journal of Learning Disabilities*, *11*, 17-29.
- Temple, E., Deutsch, G., Poldrack, R., Miller, S., Tallal, P., Merzenich, M. & Gabrieli, J. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: Evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*, 2860-2865.
- Tomblin, J., Records, N., Buckwalter, P., Zhang, X., Smith, E. & O'Brien, M. (1997). Prevalence of specific language impairment in kindergarten children. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, *40*, 1245-1260.
- Torgesen, J., Alexander, A., Wagner, R., Rashotte, C., Voeller, K. & Conway, T. (2001). Intensive remedial instruction for children with severe reading disabilities: Immediate and long-term outcomes from two instructional approaches. *Journal of Learning Disabilities*, *34*, 33-58.
- Torgesen, J., Wagner, R., Rashotte, C., Rose, E., Lindamood, P., Conway, T. & Garvan, C. (1999). Preventing reading failure in young children with phonological processing disabilities: Group and individual responses to instruction. *Journal of Educational Psychology*, *91*, 579-593.



Informations et annonces de colloques

